

晋陕宁黄土丘陵区生态修复与农林牧业 持续发展仿真研究

张汉雄, 上官周平*

(1. 中国科学院水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学, 陕西杨凌 712100)

摘要: 晋陕宁黄土丘陵区土壤侵蚀严重, 生态环境脆弱, 不合理利用土地是其主要原因, 生态修复与环境重建是该区生态与经济持续发展的重要战略措施。应用系统动力学(System Dynamic, 简称 SD) 和“反馈控制(Feedback control) 理论建立了该区生态修复和环境重建的 SD 模型, 它分为人口、农业、林业、牧业、农村经济、土壤侵蚀和生态环境 6 个模块, 仿真时间 1990~ 2080 年, 步长 1a。经检验该 SD 模型的有效性为 93.5%, 可用于未来仿真预测。根据该区的生态环境特点和农牧业发展现状, 选择生态环境恢复重建的 3 种典型模式——同步发展模式(A 模式)、逐步调整模式(B 模式) 和现状发展模式(C 模式) 进行仿真研究, 预测 3 种模式 2000~ 2080 年的土壤侵蚀、土地利用的发展动态以及农林牧业和生态环境演化趋势。仿真结果表明: 土地利用与农、林、牧业持续发展密切相关, 坡耕地和草场退化是制约农林牧业发展的主要因素。合理调整土地利用结构和加速治理侵蚀, 可促进生态环境逐步恢复和农林牧业持续发展。同步发展模式(A 模式) 是该区生态修复和环境重建的 3 个仿真模式中的最优策略, 它可促进农林牧协调发展和生态-经济趋向良性循环, 并提出该区生态修复与环境重建的对策措施。该 SD 模型结构合理, 运行功能良好, 能较真实的模拟具有多变量、非线性变量的复杂生态系统的动态行为, 为生态修复研究提供一种有效工具。

关键词: 晋陕宁黄土丘陵区; 生态修复; 土地利用; 土壤侵蚀; 仿真研究; 持续发展

文章编号: 1009-0933(2006)01-0297-08 中图分类号: Q14, S181, X32, X144 文献标识码: A

The simulation study of the rehabilitation of ecological environments and the sustainable developments of agriculture, forestry, animal husbandry in the loess hilly regions in Shanxi Province, Shaanxi Province and Ningxia Autonomus Region

ZHANG Han-Xiong, SHANGGUAN Zhou-Ping (1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China; 2. Northwest A & F University, Yangling 712100, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 297~ 304.

Abstract: The hilly loess regions suffer severe soil erosion and thus form fragile ecological ecology environments mainly because of their improper land uses and as a result ecological rehabilitation and environmental reconstruction are the strategies for the sustainable ecological and economic developments in these regions. With its simulation step length standing at one year and its simulation period spanned between 1990 and 2080, the study, relying on the theories in system dynamics (shortened as SD) and feedback control and, has established the SD models of ecological rehabilitation and environmental reconstruction whose 6 modules being respectively aimed at agriculture, forestry, animal husbandry, rural economy, soil erosion and ecological environment. The models have been tested with plus software on PC computer to have an efficiency of 93.5% and can be used for the future

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(2002CB111502); 中国科学院西部之光人才培养计划联合学者资助项目

收稿日期: 2005-03-03; 修订日期: 2005-09-10

作者简介: 张汉雄(1945~), 高级工程师, 主要从事水土保持、恢复生态学与生态环境研究。

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: shnagguan@ms.iswc.ac.cn

Foundation item: National Key Project for Basic Research and Development Plan (No. 2002CB111502), the United Scholar's Item of Talent Training Program in West China of Chinese Academy of Sciences

Received date: 2005-03-03; **Accepted date:** 2005-09-10

Biography: ZHANG Han-Xiong, Senior engineer, mainly engaged in soil and water conservation, restoration ecology and environment in loess region.

simulation predictions. Considering the characteristics of ecological environments and the developmental actualities of agriculture and animal husbandry in the regions, there are three representative models, synchronous developmental model (Model A), progressive adjustment model (Model B) and actual development model (Model C), which have been chosen for the ecological and environmental reconstructions of these regions in analyzing and predicting the trends in soil erosion, land use, agriculture, forestry and animal husbandry and ecological environment evolution between 2000 and 2080. The simulation results show as follows:

Land use closely relates to the sustainable developments of agriculture, forestry and animal husbandry, and the degeneration of slope farmland and grassland degenerations are the main limiting factor in the sustainable developments of agriculture, forestry and animal husbandry. Thus, properly regulated land use and accelerated erosion control are capable of enhancing the gradual ecological rehabilitation and the sustainable developments of agriculture, forestry and animal husbandry.

Of the three simulation models, synchronous developmental model is the optimal strategy for ecology ecological rehabilitation and environmental reconstructions in these regions. It can promote the coordinative development of agriculture, forestry and animal husbandry and help to form a good ecological and economic cycle.

With its good structure and performance, the SD model is capable of the dynamic actions of complex ecosystems involving multiple variables and nonlinear variables thereby becoming an effective tool in the research of ecological rehabilitation. The major problems of the SD model are that because the model covers a large scope and involves some statistically generalized parameter and field experimental data about erosion, which are not completely representative, it suffers in reliability and efficiency and thus needs to further modify the sampling and analyzing methods to guarantee proper parameters and thus make the model perform well.

Key words: hilly loess regions; Shanxi Province; Shaanxi Province; Ningxia Autonomous Region; ecological rehabilitation; land use; soil erosion; simulation research; sustainable development

晋陕宁黄土丘陵区土壤侵蚀严重, 生态环境脆弱, 生态修复是改善脆弱生态环境和生产条件、促进区域持续发展的关键, 也是西部大开发的重要举措。生态修复涉及退耕还林种草、粮食产量稳定增长、土壤侵蚀治理和农林牧业与农村经济持续发展诸多方面^[1-3], 系统综合性强。为深入探索区域生态修复与合理利用土地、控制土壤侵蚀和生态环境的动态发展关系, 应用系统动力学模型对该区的生态修复进行仿真研究, 为该区的环境治理、资源开发和持续发展提供科学依据。

1 晋陕宁黄土丘陵区的土地利用与生态环境现状

晋陕宁黄土丘陵区泛指黄土高原中部的丘陵沟壑地带, 包括晋西、陕北、宁南的 31 个县(市), 总面积 $772.8 \times 10^4 \text{ km}^2$; 其中丘陵沟壑面积 $699.77 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占 90.55%, 其余为川台塬地, 占 9.45%。该区沟壑密度 $4.5 \sim 7 \text{ km/km}^2$, 沟谷相对高差 150~200m, 地形破碎, 土壤侵蚀严重, 生态环境脆弱。2000 年总人口 671.99×10^4 人, 人口密度 86.95 人/km^2 , 农村人均纯收入 985 元。

1.1 土地利用现状及存在问题

据有关省区土地资源 II 级分类资料^①, 该区实际耕地面积 $272.5 \times 10^4 \text{ km}^2$, 林地 $121.43 \times 10^4 \text{ km}^2$, 牧荒地 $221.28 \times 10^4 \text{ km}^2$, 分别占总面积的 35.26%、15.71% 和 28.63%, 非生产地和未利用地占 20.39%。耕地中, 梯田、坝地等基本农田 $17.71 \times 10^4 \text{ km}^2$, 较平缓川台地 $51.12 \times 10^4 \text{ km}^2$, 坡耕地 $203.67 \times 10^4 \text{ km}^2$, $\geq 25^\circ$ 的坡耕地有 $155.99 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占耕地的 57.25%, 需逐步退耕还林草。土地利用中的主要问题是:

(1) 土地利用不合理、耕地多, 农业人均耕地 $0.56 \sim 0.77 \text{ km}^2$, 高者达 1.30 km^2 , 林牧地少, 坡耕地土壤侵蚀严重。部分县耕地占总面积的 45%~55%, 而林地仅占 10% 左右, 牧地仅约占 5%。过度耕垦导致人为加速侵蚀、生态环境恶化, 粮食产量不稳, 制约农林牧业发展。

① 陕西省土地管理局. 陕西省土地利用现状调查数据集. 1996, 105~168; 山西省国土资源局. 山西省土地资源. 1997, 174~205; 宁夏回族自治区国土资源局. 宁夏回族自治区土地资源. 1998, 95~135

(2) 耕地主要是干旱瘠薄的坡耕地,基本农田少,广种薄收,粮食单产低而不稳,仅约 $1500\text{kg}/\text{hm}^2$ 。由于气候干旱、土壤侵蚀强,生产力低,因而导致轮山倒种、垦荒、土壤侵蚀加剧的恶性生态经济循环。

(3) 林地少,且多为灌木和人工林,分布稀疏、生态功能低,经济效益差。由于农村经济贫困、能源短缺,垦荒毁林较普遍,退耕造林种草发展不稳定,故生态修复与综合治理应同步协调快速发展。

(4) 草场退化、超载过牧,导致草场生产力降低,载畜量大起大落,荒山坡土壤侵蚀加剧。

1.2 水土流失与生态环境特点

该区黄土层厚 $100\sim 150\text{m}$,质地疏松,易侵蚀,加之植被稀少,地形破碎,土壤侵蚀严重。侵蚀程度大致分为 3 类:强度与强烈侵蚀,侵蚀模数在 $8000\sim 14000/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,侵蚀地类为坡耕地、撩荒地和风沙丘陵区;中度侵蚀模数在 $4000\sim 8000/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,主要是荒山坡、稀疏灌木地;轻度侵蚀模数为 $1500\sim 4000/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,侵蚀地类为盖度小的未成林地、坡地果园、缓坡耕地及未防护的非生产地。

该区水土流失总面积为 $606.63\times 10^4\text{hm}^2$,占总面积的 78.5% ,其中较严重的侵蚀面积 $423.34\times 10^4\text{hm}^2$,强度、中度、轻度侵蚀面积分别占 25.98% 、 43.94% 和 30.09% ,轻微侵蚀面积为 $183.29\times 10^4\text{hm}^2$ 。虽多年来综合治理减少了侵蚀,但垦荒、轮山倒种、种草复耕、超载放牧等不合理利用土地又加速侵蚀,侵蚀动态变化剧烈,生态修复与农林牧业能否协调持续发展,需仿真研究其调控和对策措施。

2 区域生态修复与环境重建 SD 模型

2.1 区域生态修复与环境重建的仿真研究思路与方法

区域生态修复涉及土地利用、农林牧业和生态环境协调发展诸多方面,且需近期与中远期的经济-生态效益统筹兼顾,是一个庞大复杂的生态经济系统。该系统受农林牧业、生态环境和人为活动等因素影响与制约,相互抑制与促进,形成多重正、负反馈环,使系统行为产生复杂的多维动态变化。

根据系统动力学(System Dynamic,简称 SD)和反馈控制(Feedback control)原理^[4,5],系统结构决定其动态行为。因此,可建立区域生态修复的 SD 模型,对生态修复中退耕还林草与土地利用合理调整、土壤侵蚀、农林牧业与生态环境协调持续发展的动态变化进行仿真研究,寻求生态环境恢复重建的最佳方案与对策措施。仿真研究的方法步骤是:

(1) 实地调研考察系统,分析资料,对系统诊断,确定影响因素、发展目标及生态经济评价指标。

(2) 分析系统结构特征及其因果关系,建立具有正、负反馈环的系统结构流图(即 Forrester 图)。

(3) 参数确定 模型参数要合理、有代表性,故用统计分析法对该地的实际资料概化,如粮食单产、产草量、人畜需求标准等参数,由安塞、固原、神木试点的野外试验资料确定不同类型土地与治理措施的侵蚀模数等变量参数值。然后按系统流图关系,用 DYNAMO 语言编写方程,即为 SD 模型。

(4) 仿真实验 仿真过去检查模型的有效性,然后初选 3 个比较模式,仿真并预测未来发展动态。

2.2 区域生态修复与环境重建系统仿真 SD 模型

该 SD 模型包括系统流图和构造方程两部分,系统流图(图 1)是系统中变量关系的定性描述,构造方程即其定量表达,二者相辅相成。该 SD 模型含 15 个状态方程,30 个流率方程,115 个辅助方程和 137 个参数,按类型分为人口、农业、林业、牧业、农村经济、土壤侵蚀与生态环境 6 个模块。

(1) 农业模块 调整耕地、粮田、经济作物面积,预测粮食产量与供需平衡,主要方程:

$$L \quad \text{FAD. K} = \text{FAD. J} + \text{DT}(\text{FADI. JK} - \text{FADR. JK})$$

$$R \quad \text{FADI. KL} = \text{RAA. KL} + \text{RAB. KL} + \text{RAC. KL}$$

$$R \quad \text{FADR. KL} = \text{RBA. KL} + \text{RBB. KL} + \text{RBC. KL}$$

$$A \quad \text{RBB. K} = \text{CLIP}((\text{CLIP}(0.85 \times \text{FAD. K} \times 10, \text{K}), 0.05, \text{V6. K}, 2.5), 0, \text{FAD. K}, \text{V10. K})$$

式中,FAD、RAA、RAB、RAC 分别为耕地、垦荒、果树减少、种草复耕面积,RBA、RBB、RBC 分别为占用耕地、退耕还林和种草面积,V10、V6 分别为总播面积和人均基本农田面积。

(2) 林业模块 协调乔木、灌木、果树面积的发展,预测果产量、木材蓄积量,主要方程:

L FOR A. K= FOR A. J+ DT× (FORAI. JK- FORAR. JK- FORAEK)

L FORB. K= FORB. J+ DT× (FORAR. JK-SOT. J/30₀)

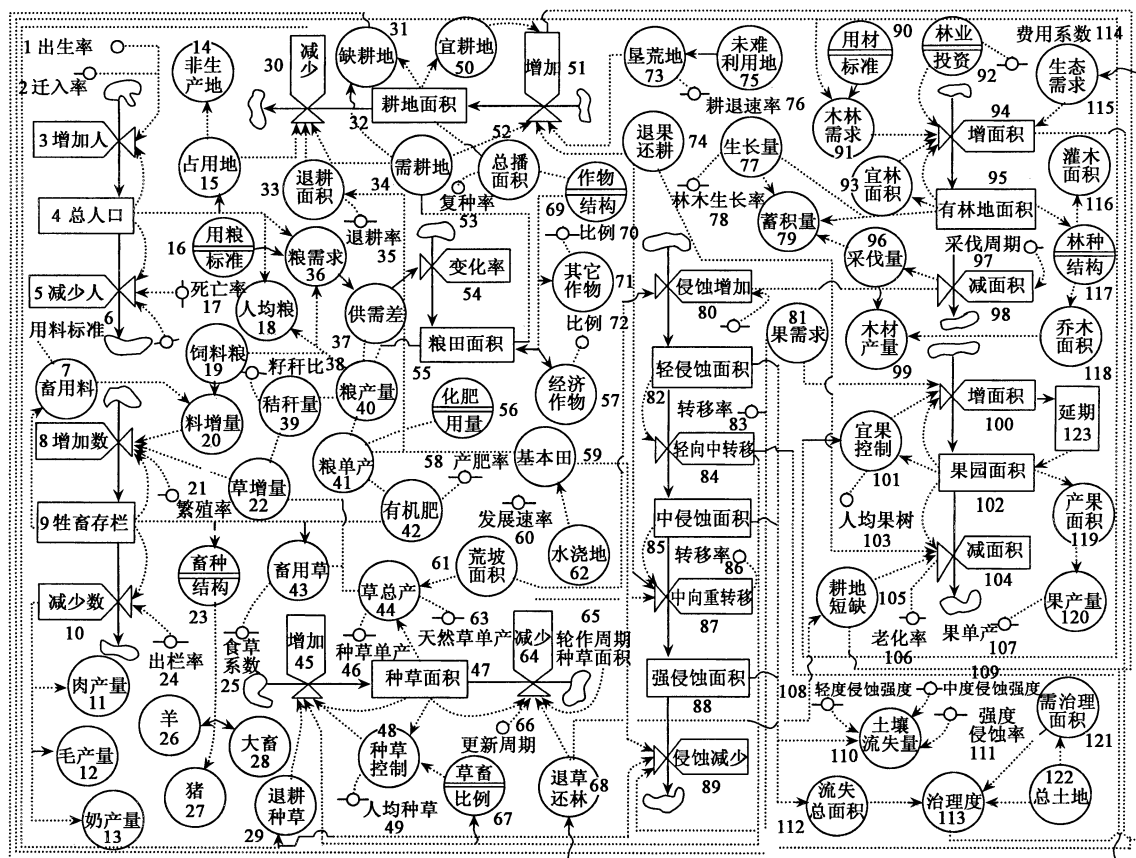


图1 生态修复与环境重建SD模型的系统流图(Forrester图)

Fig. 1 The system flow figure of SD model on ecology rehabilitation and circumstance rebuild

1. Birthrate; 2. Immigratory rate; 3. Population increment; 4. Gross population; 5. Depopulation; 6. Feeding criterion; 7. Fodder grain; 8. Increment; 9. Feeding livestock; 10. Reduction; 11. Meat output; 12. Fur output; 13. Milk output; 14. Non-production location; 15. Production location; 16. Food criterion; 17. Mortality; 18. People's average grain; 19. Forage plants; 20. Fodder increment; 21. Propagate rate; 22. Forage increment; 23. Livestock structure; 24. Slaughtered rate of livestock; 25. Feeding forage quotiety; 26. Sheep; 27. Pigs; 28. Bulky livestock; 29. Retreating cultivated land to grassland; 30. Decrease; 31. Scanty cultivated land; 32. Cultivated land areas; 33. Areas of retreating cultivated land; 34. Demand for cultivated land; 35. Retreating rate; 36. Demand for grain; 37. Difference in supply and demand; 38. Proportion of seed yield to straw yield; 39. Straw amount; 40. Grain yield; 41. Grain yield per unit area; 42. Organic fertilizer; 43. Forage; 44. Gross forage yield; 45. Increase; 46. Forage yield per unit area; 47. Grassland area; 48. Control for planting grasses; 49. Grass planted per unit area; 50. Preferable cultivated land; 51. Increase; 52. Total cultivated areas; 53. Repeated cultivated rate; 54. Variety rate; 55. Farmland area; 56. Fertilization amount; 57. Economic crop; 58. Fertilizer production rate; 59. Basic plowland; 60. Developmental rate; 61. Deserted hillside area; 62. Irrigated cultivated land; 63. Field grass yield per unit area; 64. Decrease; 65. Turnover period of cultivation; 66. Renewed period; 67. Proportion of grass to livestock amounts; 68. Retreating grassland to forest land; 69. Crop structure; 70, 72. Proportion; 71. Other crops; 73. Reclamation land; 74. Retreating orchard to cultivated land; 75. Non-available land; 76. Retreating rate of cultivated land; 77. Growth quantities; 78. Growth rate of forests; 79. Stock amounts; 80. Erosion increment; 81. Demand for fruits; 82. Slight eroded areas; 83, 86. Transferred rate; 84. Transferring from slight to moderate degree; 85. Moderate eroded areas; 87. Transferring from moderate to strong degree; 88. Strong eroded areas; 89. Erosion reduction; 90. Timber criterion; 91. Demand for timber; 92. Forest investment; 93. Preferable forestland areas; 94, 100. Increased areas; 95. Deforestation amounts; 96. Decrease; 97. Turnover period of deforestation; 98, 104. Decreased areas; 99. Timber production; 101. Control for orchard; 102. Orchard areas; 103. People's average orchard; 105. Be short of cultivated land; 106. Aging rate; 107. Fruit yield per unit area; 108. Slight eroded intensity; 109. Moderate eroded intensity; 110. Soil runoff amounts; 111. Strong eroded intensity; 112. Total runoff areas; 113. Controlling degree; 114. Expense quotiety; 115. Ecological demand; 116. Shrub areas; 117. Forest structure; 118. Arbor areas; 119. Fruit yield areas; 120. Fruit yield; 121. Needing managed areas; 122. Total land areas; 123. delay

$$R \quad \text{FORAL.KL} = (\text{FORA.K} + \text{FORB.K}) \times \text{CLIP}(0, P_1, \text{FORB.K} + \text{FORA.K}, 0.67 \times V_{67})$$

$$L \quad \text{SOT.K} = \text{SOT.J} + \text{DT} \times (\text{SOTI.J} - \text{SOT.J}/m_{12})$$

$$R \quad \text{SOTI.KL} = 0.12 \times \text{FORA.K} + 0.05 \times \text{FORB.K}$$

式中, FOR A、FORB 分别为幼林和中成林面积; FORAR 是幼林转中成林面积, FORAE 为幼林破坏面积; P_1 为造林速率, V_{67} 为宜林面积, SOT 为木材蓄积量, SOTI 为生长量, m_{12} 为采伐周期。

(3) 牧业模块 预测各类草场面积、饲草供需平衡和载畜量, 主要方程为:

$$L \quad \text{BRE.K} = \text{BRE.J} + \text{DT} \times (\text{BREI.JK} - \text{BRER.JK})$$

$$R \quad \text{BREI.KL} = m_{16} \times (\text{GRS.K} - \text{GRO.K})/m_{17}$$

$$L \quad \text{GRD.K} = \text{GRD.J} + \text{DT} \times (\text{GRDI.JK} - \text{GRDR.JK})$$

$$R \quad \text{GRDI.KL} = \text{GRD.K} \times \text{CLIP}(0, \text{CLIP}(P_4, 0.7 \times P_4, \text{RBC.KL}, \text{GRDR.KL}), \text{BREI.KL}, 75)$$

式中, GRS 为饲草供给; GRO 为饲草消耗量; BRE、BREI、BRER 分别为载畜量、牲畜繁殖和出栏数; m_{16} 、 m_{17} 分别为草增量、食草标准; GRD 为种草面积, P_4 为种草发展速度。

(4) 土壤侵蚀与保持模块 预测各类侵蚀面积、侵蚀量与治理面积的发展动态变化。主要方程为:

$$L \quad \text{SWA.K} = \text{SWA.J} + \text{DT} \times (\text{FORDR.JK} + \text{GRDR.JK} - \text{SRA.JK})$$

$$R \quad \text{SRA.KL} = \text{SWA.K} \times \text{TABHL}(\text{TP9}, \text{FAD} \cdot \text{K}, 0, 1, 0.2) - \text{RBA.KL} - m_{65} \times \text{SWA.K}$$

$$L \quad \text{SWB.K} = \text{SWB.J} + \text{DT} \times (\text{SRA.JK} + \text{NUDR.JK} - \text{SWBR.JK} - \text{GRDI.JK} - \text{FORAI.JK} - \text{FORCI.JK})$$

$$R \quad \text{SWBR.KL} = m_{66} \times \text{SWB.K} \times \text{TABHL}(\text{TP11}, \text{RAA.KL}, 0, 100, 10)$$

$$L \quad \text{SWC.K} = \text{SWC.J} + \text{DT} \times (\text{SWBR.JK} - (\text{HYDI.JK} - \text{FORAR.JK} - \text{FORDI.JK} - \text{RBB.JK}) \times m_{67})$$

$$L \quad \text{SOL.K} = \text{SOL.J} + \text{DT} \times (\text{SOLI.JK} - \text{SOLR.JK})$$

式中, SWA、SWB、SWC 分别为轻度、中度和强度流失面积; SRA、SWBR 分别为轻度向中度, 中度向强度转移面积; m_{66} 、 m_{65} 为转移速率; m_{67} 为治理措施保存率; SOL 为土壤流失总量。

该SD模型用PD(Professional Dynamo)Plus 软件在PC机运行, 仿真时间为2000~2080, 步长1a。用1990~2000年实际资料^[6~8]与仿真数据比较, 模型的有效性为93.5%, 可用于未来仿真预测。

3 3种生态修复与环境恢复重建模式的系统动态仿真分析

3.1 土地合理利用的3种生态修复模式

根据该区的农业资源与生态环境特点, 选择3种有代表性的生态修复发展模式进行仿真模拟研究:

(A) 同步发展型 生态修复与建设基本农田和生态环境治理同步快速发展, 在确保粮食稳定增长的基础上, 促进农林牧业协调发展, 耕地逐步减少到人均 0.26hm^2 , 人均基本田 0.14hm^2 , 森林盖度30%以上, 生态环境逐步趋向良性循环, 农村经济较快发展, 逐步实现小康水平。

(B) 循序渐进型 在稳定粮食生产持续增长的前提下, 根据农村经济基础和农牧业发展的需要, 逐步合理调整农业用地结构, 加大退耕还林种草与环境治理速度, 使农林牧业循序渐近的持续发展。

(C) 现状发展型 近期保持传统经营模式, 坡耕地缓慢退耕, 基本农田和环境治理发展较慢, 造林种草有一定发展, 粮食供给低标准自给。中后期林草面积有较大发展, 生态修复与农林牧业发展不协调。

3种生态修复与环境重建模式的2000~2080年仿真结果见表1~表2和图2~图3。

3.2 同步发展模式(A模式)的土地利用与土壤侵蚀发展动态

该模式耕地面积呈逐渐递减的动态趋势, 近20a退耕较快, 年均退耕 $4.49 \times 10^4\text{hm}^2$, 到2020年, 耕地减少33.1%, 农业人均耕地 0.326hm^2 、基本田 0.043hm^2 , 粮食产量由初期的 $161.5 \times 10^4\text{t}$ 增加到 $230.2 \times 10^4\text{t}$, 粮食短缺由 $38.64 \times 10^4\text{t}$ 减至 $0.79 \times 10^4\text{t}$, 以后保持供需平衡。到2040年, 随着单产提高, 耕地减少, 退耕速度减慢; 林地较快增加, 林盖度达32.22%, 牧地面积稍有减少, 耕地面积保持相对稳定。2060年, 牧地面积基本稳定, 牧业持续发展, 林地持续增加, 森林盖度达37.7%后保持稳定, 农业人均耕地 0.26hm^2 、基本农田 0.14hm^2 。乔

木、灌木和果树面积均有增长,乔、灌木面积比约为 6 4。

由于造林种草与生态环境治理同步发展,不同程度侵蚀面积显著减少。轻度侵蚀面积呈前期增加,中后期缓慢减少的波动变化,最终比基期减少 20.62%;中度侵蚀面积持续减少,最终可减少 77.91%;强度侵蚀前期快速减少,后期趋于稳定状态的波动变化(图 3),最终可比基期减少 95.01%。侵蚀面积将由现状的 $423.34 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 减至 $134.77 \times 10^4 \text{ hm}^2$,减少 68.17%,后期主要为人为活动增加的轻度侵蚀。总侵蚀量由初期的 $31640 \times 10^4 \text{ t}$ 可减至 $7647 \times 10^4 \text{ t}$,减少 75.83%,生态环境有明显改善。

表 1 3 种仿真模式的土地利用与粮食生产发展动态

Table 1 The development dynamics of land use and grain for three simulating patterns														
模式 Pattern	年份 Year	总人口 (10^4 人) Total population (10^4)	用地面积(10^4 hm^2) Area of land use			林种面积(10^4 hm^2) Area of forest kind			种草 面积 Area of grow grass (10^4 hm^2)	人均(hm^2) Per person possess		粮食产量(10^4 t) Grain yield		人均 粮(kg) Grain of per person
			耕地 Farmland	林地 Forest	牧地 Ley	乔木 Arbor	灌木 Shrub	果园 Garden		耕地 Farmland	基本田 High yield land	产量 Grain yield	余缺 Surplus and lackgr	
A	2000	671.99	272.50	121.43	221.28	62.33	41.47	17.63	7.11	0.47	0.026	161.5	-38.64	240.3
	2020	757.56	182.79	190.70	268.66	101.85	63.60	25.25	9.97	0.33	0.043	230.2	-0.79	303.9
	2040	777.89	151.23	249.01	259.92	140.33	81.34	27.33	15.05	0.29	0.089	240.9	0.68	309.7
	2060	771.15	128.27	291.59	246.96	166.36	99.25	25.98	23.16	0.26	0.138	237.9	1.53	308.5
B	2020	757.56	195.55	181.83	277.68	96.50	60.53	24.80	6.94	0.35	0.037	231.5	0.09	305.6
	2040	777.89	159.30	227.60	275.26	125.71	74.72	27.18	7.41	0.31	0.075	260.4	18.81	334.7
	2060	771.15	135.49	257.08	279.24	142.91	88.32	25.85	7.98	0.27	0.117	251.7	12.66	326.4
C	2020	757.56	199.47	174.07	296.62	92.03	57.95	24.08	5.20	0.36	0.035	215.2	-15.79	283.9
	2040	777.89	162.39	210.43	312.33	114.04	69.35	27.05	4.06	0.32	0.069	227.5	-3.98	292.5
	2060	771.15	141.44	228.37	318.01	122.47	79.73	26.17	3.21	0.29	0.105	230.8	-0.97	299.4

未利用地和非生产地未列,故各年农林牧用地总和不相等 The total area of the farmland, forest land and grazing land is variable because of the land of non-use and non-yieldly are not included

表 2 3 种仿真模式的土壤侵蚀与生态经济效益发展动态

Table 2 The development dynamic dynamics of soil erosion and ecology benefits for three simulating patterns													
模式 Pattern	年份 Year	侵蚀面积 Area of erosion (10 ⁴ hm ²)	分类侵蚀面积(10 ⁴ hm ²) Area of per erosion class			治理面积 Control erosion area (10 ⁴ hm ²)	侵蚀量 Erosion quantity		森林 盖度 Forest cover(%)	木材蓄积 Wood cumula- tion (10 ⁴ m ³)	载畜量 Carry of livestock (10 ⁴ 羊 sheep)	总产值 Total out put (10 ⁸ 元 Yuan)	人均收入 Income of per person (元 yuan)
			轻度 Light	中度 Middle	强度 Inten- sity		总量 Total erosion (10 ⁴ t)	减少 Reduced erosion (%)					
A	2000	423.34	109.98	185.97	127.39	146.25	31640	0.00	15.71	804.0	751.54	31.27	985
	2020	298.08	110.49	110.05	77.54	233.73	20980	33.77	24.68	2601.6	686.8	53.25	2550
	2040	173.15	96.89	67.67	8.59	319.53	10290	67.52	32.22	500.4	8901.9	66.64	5502
	2060	134.77	87.31	41.10	6.36	394.07	7647	75.86	37.73	7582.6	870.2	68.35	9473
B	2020	319.65	112.25	116.86	90.54	221.83	22870	27.81	23.53	2559.4	679.56	52.98	2495
	2040	243.62	108.35	95.05	40.22	290.48	16030	49.40	29.45	4752.3	776.97	66.67	4835
	2060	199.60	112.69	78.41	8.30	344.44	11790	62.78	33.27	6906.2	820.37	66.93	8975
C	2020	313.77	111.67	112.95	89.21	213.15	22410	29.26	22.52	2523.6	676.6	47.57	2456
	2040	253.93	106.23	97.52	50.8	271.37	17110	45.99	27.23	4548.1	787.6	60.70	4725
	2060	219.23	110.47	93.08	15.69	312.86	13520	57.32	29.55	6367.3	836.7	62.31	7850

总产值和人均收入按 2000 年价格计算 The total output and income of per person are calculated based on the price of 2000 year

3.3 循序渐近模式(B 模式)的土地利用与土壤侵蚀发展动态

该模式的农、林、牧土地利用及不同程度土壤侵蚀面积的发展趋势与 A 模式基本相似,前期退耕速度比 A 模式稍小,中后期稍大,最终耕地与 A 模式保持同一水平;到 2020 年粮食生产基本保持供需平衡状态,以后有少量余粮。牧地面积基本上没有多大变化,牧业稳定发展。到 2060 年,耕地保持稳定,届时人均耕地 0.27 hm^2 、基本田 0.12 hm^2 ,森林盖度为 33.27%。该模式退耕造林种草与侵蚀治理发展循序渐近,初期林地发展较快,中后期减慢。轻度侵蚀面积比基期稍有增加,后期中度、强度侵蚀面积分别比基期减少 57.80% 和 93.48%,侵蚀量比基期减少 62.78%,生态环境有较显著的改善。

3.4 现状发展模式(C 模式)的土地利用与土壤侵蚀发展动态

该模式近 20a 耕地面积也有减少, 林地面积有较大发展, 但基本农田发展较慢; 到 2020 年, 粮食产量为 $215.2 \times 10^4 \text{ t}$, 缺粮 $15.79 \times 10^4 \text{ t}$ 。由于退耕造林种草与治理发展不同步, 农林牧业不协调, 随着耕地减少, 基本农田发展慢, 粮食产量增幅不大; 2040~2060 年, 人均粮食 292~299kg, 粮食缺口由 $15 \times 10^4 \text{ t}$ 减少到 $1 \times 10^4 \text{ t}$, 粮食供需基本平衡; 后期造林种草发展较慢, 牧地以天然草场为主, 人工种草发展较少, 为满足粮食生产需求, 后期退耕速度减缓。到 2060 年, 森林盖度达 29.56%; 届时人均耕地 0.29 hm^2 、基本田 0.105 hm^2 ; 牧地近期有较大增加, 以后保持波动变化、缓慢增加, 载畜量稳定增长。该模式的粮食产量、载畜量、农产值、人均收入均较 A、B 模式低。

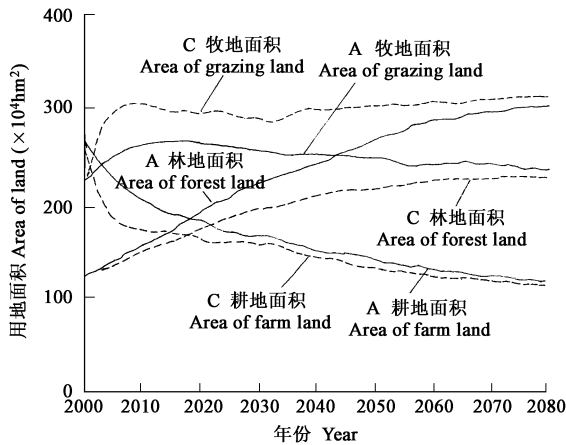


图 2 同步发展(A)模式与现状发展(C)模式的土地利用动态变化

Fig.2 The dynamic changes of land use for a synchronization development pattern (A) and an actuality development pattern (C)

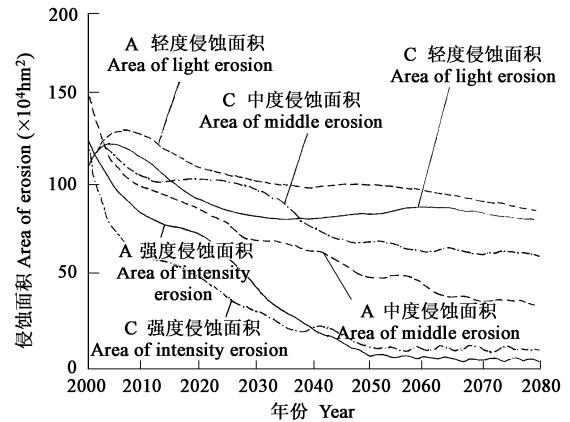


图 3 同步发展(A)模式与现状发展(C)模式的土壤侵蚀发展动态

Fig.3 The dynamic changes of soil erosion for a synchronization development pattern (A) and an actuality development pattern (C)

轻度侵蚀面积呈前期增加—快速减少—稳定的波动变化趋势, 几乎没有减少; 中度侵蚀呈快速减少—缓慢减少—稳定的变化趋势; 强度侵蚀呈快速减少—缓慢减少—小幅波动的稳定状态。到 2060 年, 中度、强度侵蚀面积分别比现状减少 49.95% 和 86.5%, 侵蚀量减少 57.32%, 中后期以轻中度侵蚀为主。由于森林盖度小, 后期中轻度侵蚀有增加趋势, 生态环境没有明显改善。

3.5 3 种生态修复模式的综合评价

应用多目标模糊综合评审方法对 3 种模式仿真的经济效益(人均收入, 农业总产值, 产业结构)、社会效益(粮产量, 载畜量, 木材蓄积量, 果品产量)、生态效益(森林盖度, 中、强度侵蚀面积, 土壤流失总量)和系统的总体功能进行综合评审。评审结果(略)表明: 3 个目标期(2020 年, 2040 年和 2060 年), 统筹兼顾各种效益, 3 种模式的总体功能值的优序均为 A 模式最优, B 模式次之, C 模式最差。近期各模式的差异较小, 由于森林的生态效益滞后和补偿效应显著, 后期各模式的功能差异较显著。

因此, 同步发展模式是该区生态修复和环境重建的最优策略, 它可促进农林牧协调发展和生态环境趋向良性循环。在该区农村经济贫困、投资有限的情况下, 为促进生态经济协调发展, 循序渐进模式也不失为一种可供选择的生态修复和环境重建的次优发展方案。

4 讨论

通过上述 3 种模式仿真的该区生态修复与农林牧业发展动态分析, 可以看出:

(1) 合理利用土地与农、林、牧业持续发展密切相关, 各类用地面积发展相互制约, 呈非线性动态变化, 坡耕地和草场退化是制约农林牧业发展的主要因素。合理调整土地利用结构和加速治理可减少侵蚀, 促进生态环境逐步恢复和农林牧业持续发展; 反之, 生态环境恶化, 系统总体功能降低。

(2) 现状发展模式下, 植被恢复缓慢, 土壤侵蚀呈增长趋势, 且处于由轻到中、由中到强的转化与发展过

程,有加剧生态环境恶化的潜在危害。故应根据当地的生态环境特点和农林牧业发展优势,因地制宜,采取同步发展模式及其相应的对策措施,促进生态环境恢复和农林牧业持续发展。

(3) 正确认识系统、选择变量是合理构模的基础。该模型结构合理,变量关系与实际系统相符,运行状态良好,仿真中系统能够变目标跟踪控制,收敛于目标,较真实的模拟系统的动态行为。因而,该模型可应用于多变量、具有非线性变量的复杂生态系统的仿真,为生态修复研究提供一种有效工具。

(4) 合理确定参数是提高仿真结果可信度的关键。由于该系统范围大、各地生态经济状况千差万别,某些统计分析的概化参数和野外侵蚀试验的资料也不完全具有代表性,影响仿真结果的有效性与可信度。需进一步改进数据采集和处理分析方法,合理确定参数,使SD模型的应用日趋完善。

5 生态修复与环境重建的对策与措施

为促进晋陕宁黄土丘陵区脆弱生态环境修复和区域经济持续发展,须采取以下对策措施:

(1) 合理调整土地利用结构,大力发展基本农田,促坡地退耕造林种草。坡耕地土壤侵蚀强烈,故应大力发展水平梯田、条田、坝地等基本农田,改善农业生产条件,提高粮食单产,促林牧业发展。改变传统经营方式,严禁垦荒、撂荒,促陡坡退耕造林种草,以减少土壤侵蚀。并大力发展旱作农业和生态农业,形成立体农业综合互补的高产农田体系,推广现代科学耕作技术,提高土地生产力。

(2) 林业发展应乔、灌、果并重,灌草带相配合,选择适地优良树种,生态与经济效益兼顾。黄土丘陵区乔、灌、果林种的合理比例为4.5:4:1.5,应因地制宜,选择适地树草种。川平滩地应建农田防护林,沟壑营建杨、柳、榆沟道防冲林;沟坡、原边和荒漠建柠条、紫穗槐、草木栖等为主的灌草混交带,防风固土防侵蚀。并大力发展苹果、梨、枣等果树,提高林业经济效益。逐步增加森林植被覆盖度,防止土地退化,改善农田生态环境和生产条件,促进农牧业发展。

(3) 种草养畜,以草定畜。大力发展苜蓿、沙打旺等人工草,实行草田轮作、草灌混交和改良草场,提高草地生产力。合理控制载畜量和调整畜群结构,以草定畜,防止草场退化,促牧业持续稳定发展。

(4) 生态修复与环境重建应近期与中远期效益统筹兼顾。在不同阶段应根据农村经济发展状况合理调整治理策略,采取农牧协调发展或农林牧综合发展,兼顾生态与经济效益,循序渐进,可逐步改善生态系统运行机制与功能,促进生态自然恢复、环境改善和区域经济持续发展。

(5) 控制人口增长,提高农村人口素质和科技知识。推广科学种植和养殖,增强村民的环境保护意识,使人文景观与生态环境协调发展。

References:

- [1] Wang X L, Bao Y H. Study on the methods of land use dynamic change research. *Progress in Geography*, 1999, 18(1): 81~ 87.
- [2] Gao B S, Zhu S J. Limiting factors for the restoration and reconstruction of vegetation in the ecologically vulnerable zone. *Journal of Northwest Forestry University*, 2000, 15(9): 56~ 62.
- [3] Shanguan Z P, Peng K S, Peng L, *et al.* Grain production and sustainable development in the Loess Plateau. Xi'an: People's Press of Shaanxi, 1999. 145~ 154.
- [4] He W W. Feedback controlling theory. Shanghai: Guangming Daily Press, 1996. 213~ 218.
- [5] Wang Q F. System Dynamics. Beijing: Tsinghua University Press, 1988. 154~ 165.
- [6] Statistic Bureau in Ningxia Hui Autonomous Region. *Statistic Annals (2000) in Ningxia*. 2000. 145~ 178.
- [7] Statistic Bureau in Shanxi Province. *Rural economic statistics for 50 years in Shaanxi Province*. 2000. 251~ 298.
- [8] Statistic Bureau in Shanxi Province. *Statistic Annals (2000) in Shanxi Province*. 2000. 324~ 384.

参考文献:

- [1] 王秀兰,包玉海. 土地利用变化研究方法探讨. *地理科学进展*, 1999, 18(1): 81~ 87.
- [2] 高保山,朱守军. 生态脆弱带植被恢复与重建制约因子研究. *西北林学院学报*, 2000, 15(9): 56~ 62.
- [3] 上官周平,彭珂珊,彭琳,等著. 黄土高原粮食生产与持续发展研究. 西安:陕西人民出版社,1999. 145~ 154.
- [4] 何文蛟. 反馈控制理论. 上海:光明日报出版社,1986. 213~ 218.
- [5] 王其藩. 系统动力学. 北京:清华大学出版社,1988. 154~ 165.
- [6] 宁夏回族自治区统计局. *宁夏统计年鉴(2000)*, 2000. 145~ 178.
- [7] 山西省统计局. *陕西省农村经济统计五十年*, 2000. 251~ 298.
- [8] 山西省统计局. *山西省统计年鉴(2000)*, 2000. 324~ 384.